空心塑料球堆积床空气加湿传质系数的测定

伍纲，郑宏飞，程鹏，康慧芳

北京理工大学机械与车辆工程学院，北京，100081

摘要：对增湿除湿型太阳能海水淡化装置中填充空心塑料小球作为堆积床的传质系数进行了实验测试，并与其他材料堆积床的传质系数进行了比较。介绍了测试装置的结构和工作过程，给出了传质系数随不同运行参数的变化关系。实验结果表明，该空心塑料小球由于具有较大的润湿表面和内部具有储水多孔材料，因而具有较高的蒸发传质系数。在系统冷却水和喷淋温度分别为 25℃和 80℃时，传质系数比使用方木条时提高了约 8%。实验结果还说明，喷淋量及循环风量对传质系数的影响一般是正向的，喷淋量及风速增加，传质系数将增加，但风速达到一定程度后，增加循环风量使传质系数增加幅度变小。

关键词：海水淡化；加湿除湿，传质系数；太阳能

Determination of Mass Transfer Coefficient for Air Humidification Packed Bed using Hollow Plastic Ball

WU Gang, ZHENG Hong-Fei, CHENG Peng, KANG Hui-Fang

(School of Mechanical engineering, Beijing Institute of Technology, Renewable Energy Engineering Center of Nation, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: This paper performed experimental tests on the mass transfer coefficient of humidification and dehumidification solar desalination device filled with hollow plastic ball as a packed bed and compared with the mass transfer coefficients of other material packed beds. We introduce the structure and operation of the test device and present the relationship of the mass transfer coefficient changing with different operating parameters. The experimental result indicates that this hollow plastic ball has a relatively high evaporation mass transfer coefficient due to the relatively high wet surface and interior porous water storage material. When the cooling water system and spray temperatures are 25℃ and 80℃, the mass transfer coefficient is about 8% higher than that using square wood as a packed bed. The experimental result also indicates that the effect of spraying amount and circulating flow on the mass transfer coefficient is generally positive, i.e., the mass transfer coefficient increases with the spraying amount and wind speed. However, when the wind speed reaches a certain extent, the increase of mass transfer coefficient with the circulating flow will become smaller. In addition, the concentration of sea water also has a great influence on the mass transfer coefficient.

Key words: desalination; humidification and dehumidification; mass transfer coefficients; solar

0 引言

增湿除湿海水淡化技术由于具有无需在负压下运行、对海水预处理要求低、部分部件可以用非金属制造和对运行温度要求不严格等诸多优势，被认为是高效利用太阳能生产淡水的最具有应用前景的方式，从而成为了各国研究学者的关注热点，并取得了较好的研究成果[1-4]。

在增湿除湿海水淡化中，对空气的加湿过程是最关键的，为此，研究者开发了多种加湿床，实验了多种加湿材料，主要是为了提高蒸发床的传质系数。在理论研究中，Nawayseh[5] 等对加湿器中的热质传递系数进行了理论评估，给出了传质系数随过程参数的变化。G Prakash[6]等定义了增湿除湿海水淡化装置中热质传递的“修正热容比率”，并对此进行了研究，同时搭建了日产淡水 700 升规模的海水淡化系统，验证了系统性能系数与传质系数之间的正向关系。S Farsad[7]等人研究了以太阳能为热源的增湿除湿海水淡化循环过程，提出了蒸发器、冷凝器和其他附属部分的热力学、热质平衡公

基金项目：国家自然科学基金资助项目（U1261119）

作者简介：伍纲（1985-）男，在读博士，主要从事太阳能热利用方面的研究。通信作者：郑宏飞，教授， E-mail：hongfeizh@bit.edu.cn。

式，通过对这些公式的数学推导来分析运行参数对装置产水性能的影响程度。在实验研究方面，S. Bergero(2001)提出了使用疏水毛细管作为接触器，得到了单位容积 593m^2/m^3 的传质面积[8]。Nawayseh NK（1996）采用了木条作为蒸发器堆积床，得到了很好的效果[9]。M.M. Farid,（2002）和 Al-Hallaj S.（1998）分别对采用方形木条做堆积床进行了实验研究，并对木条横向堆积、竖向堆积以及 45° 倾斜堆积的实验结果进行了比较，认为合理的堆积方式，可以得到单位容积 87m^2/m^3 的传质面积，效果良好[10-11]。K. Zhani（2013）还介绍了利用荆棘树和荆棘叶做堆积床的研究结果，并整理出传热传质系数的经验公式，证明能够很好的强化加湿器的传质过程[12]。然而，这些采用自然生物物质的系统具有耐久性差的缺点，因此寻找耐用并有良好传质系数的堆积床材料具有很好的工程意义。

为此，我们选择在市面上易于采购的空心塑料小球做堆积床的材料，对它的传质过程和传质系数进行了实验测试。该塑料小球由于具有宽阔的润湿表面，并且内部具有储水多孔材料，因此具有较大的传质系数，是一种很好的加湿堆积床材料。

为了测试空心塑料小球堆积床的传质系数，我们设计了如图 1 所示的单效加湿除湿海水淡化系统。本系统采用空气强制循环运行，工作由两个独立的蒸发加湿和冷却去湿过程组成。进入加湿器的海水温度可调，循环风速及冷却水流速等也可调。图 2 展示了本文设计的单效加湿除湿海水淡化系统和堆积床所采用的填充料照片。其工作原理为：冷却海水由水泵抽入系统，进入除湿器中的翅片式冷凝器中，然后从除湿器上端输出系统。为了减少排除浓海水带走余热的影响，所以在加湿器内的海水量基本保持不变，实现内部自循环。海水经喷淋器进入加湿器的上部，并经喷淋器喷淋到亲水多孔空心塑料小球堆积床上，未被蒸发的浓海水经漏水孔流到加湿器下方，在加湿器底部有一个限位水管，用来保证加湿器底部保有一定量的海水，以便循环使用。当加湿器底部的水量超过了水位限流管的高度，海水就会通过该水管流出装置之外。

加湿器产生的高温湿空气经由上风道进入除湿器中，在除湿器内冷凝产生淡水。被冷却后的湿空气在风机的作用下从下风道返回加湿器中，完成循环。产生的淡水经除湿器下部排出，并进入到淡水收集罐中。

1 实验装置的结构及工作原理

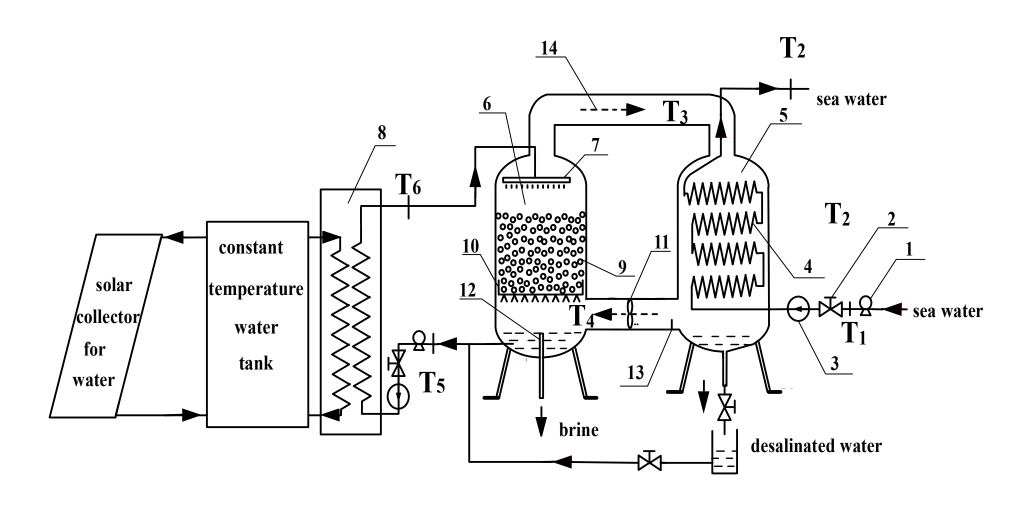


图 1 单效加湿除湿型海水淡化装置示意图

Fig.1.Schematic drawing of single-effect solar desalination system based on humidification-dehumidification

1-循环水泵; 2-阀门; 3-水表; 4-冷凝器; 5-除湿器; 6-蒸发腔; 7-喷淋器; 8- 热交换器; 9-填充床; 10-底垫; 11-循环风机; 12-限位水管; 13-挡板; 14-湿空气. T_1-进入的海水温度; T_2-冷却水出口温度; T_3-进入除湿器的湿空气温度; T_4-返回加湿器的湿空气温度; T_5-离开加湿器的浓盐水温度; T_6-进入加湿器的盐水温度

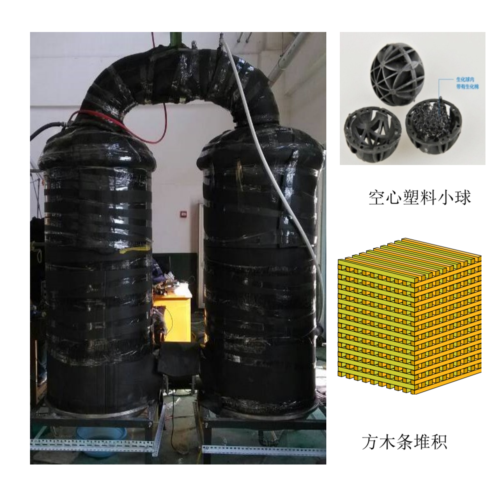


图 2 单效加湿除湿型海水淡化装置和塑料小球的实物图

Fig.2.A photograph of the experimental set up and plastic ball

该系统的加湿器和除湿器结构相同，高均为 1200mm，直径为 Φ650mm，湿空气的上下通风通道直径为 Φ260mm，塔内亲水多孔塑料小球直径为 Φ26mm，在加湿器中堆积高度为 400mm，太阳能热水系统板式换热器的换热面积为 $5m^2$。进水泵和循环水泵最大流量为 $1.50m^3/h$，实际进水流量可调节。为了比较空心小球与方形木条堆积床的传质系数优劣，本研究还设计了如图 2 所示的木条堆积床。木条大小为 2cm×3cm 长方形的杉木条，条间距为 2cm。

2 传质系数的计算方法

Nawayseh[5] 等对加湿器中的传质系数进行了定义，并给出了传质系数的计算公式如下：

$$Ka=\frac{G(H_3-H_4)}{V[\frac{(H_6-H_3)-(H_5-H_4)}{\ln\frac{H_6-H_3}{H_5-H_4}}]} \qquad (1)$$

这里，G 是湿空气的质量流量，kg/s；H 是湿空气或者水的焓，kJ/kg；K 是堆积床的传质系数，kg/m^2s；a 是堆积床的比表面积，m^2/m^3；V 是堆积床的体积，m^3。文献[5]也给出了湿空气焓和含湿量与空气温度的关系如下：

$$H=0.00585T^3-0.497T^2+19.87T-207.61 \qquad (2)$$

$$W=2.19\times10^{-6}T^3-1.85\times10^{-4}T^2+7.06\times10^{-3}T-0.077 \qquad (3)$$

这里，W 是湿空气的含湿量，kg/kg(a)；T 为温度，℃。

通过测量各点温度 T 和流量 L，计算焓值 H。并通过式（4）-（7）计算得出风量 G，散热系数 U_{loss}，总传热率 U_{cond} 和加湿器传质系数 Ka 几个关键量。

$$LCp_w(T_2-T_1)+0.5U_{loss}A_{unit}(\frac{T_3+T_4}{2}-T_{amb})=G(H_3-H_4) \qquad (4)$$

$$LCp_w(T_2-T_1)=U_{cond}A_{cond}(\frac{(T_3-T_2)-(T_4-T_1)}{\ln\frac{(T_3-T_2)}{(T_4-T_1)}}) \qquad (5)$$

$$LCp_w(T_6-T_5)-0.5U_{loss}A_{unit}(\frac{T_3+T_4}{2}-T_{amb})=G(H_3-H_4) \qquad (6)$$

$$G(H_3-H_4)=KaV(\frac{(H_6-H_3)-(H_5-H_4)}{\ln\frac{(H_6-H_3)}{(H_5-H_4)}}) \qquad (7)$$

基于上述公式，和实验测得的产水量及相关测量点的温度，即可以计算出堆积床的比表面积与传质系数积 Ka。如果忽略除湿器中湿空气与冷凝器的对流换热和除湿器与外界的热损失，那么(1)式中的 $G(H_3\text{-}H_4)$将近似于 $m_e h_{fg}$。这里 m_e 是在除湿器中的产水量，kg/s；h_{fg} 是平均冷凝温度下水的凝结潜热，kJ/kg。

3 实验结果及讨论

3.1 喷淋温度对传质系数的影响

在加湿器中，进入加湿器的海水温度对系统的产水性能有决定性的影响，为此首先对装置在不同喷淋温度下的传质系数进行测试。将运行参数调节到喷淋流量为 0.167kg/s；循环风量约为 $0.19m^3/s$；冷却水流量为 0.267kg/s。

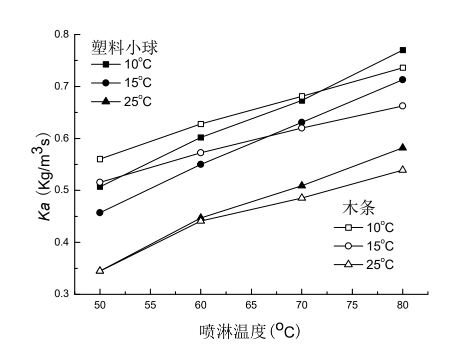


图 3. 分别采用空心小球和方木条作堆积床时传质系数随冷却水温度的变化

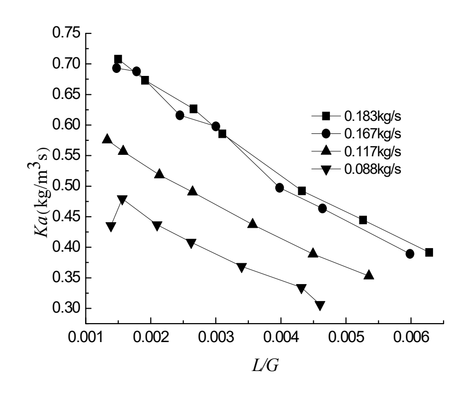
Fig.3.Variation of mass transfer coefficient packed bed using hollow ball and square wood with cooling water temperature

图 3 给出了当冷却水即进口海水取不同温度时，加湿器中分别采用空心小球和方木条做加湿堆积床的实测传质系数结果。可以看出，在维持湿空气流量及冷却水流量和温度不变的情况下，增湿器的传质系数主要取决于喷淋温度，并随喷淋温度的增加而增加，这个增加基本是线性的。这是因为，喷淋温度增加，所得到的湿空气温度也增加，那么单位体积湿空气中水蒸汽含量也增加，通过公式（3）可以知道，当温度从 50℃ 增加到 80 ℃时，湿空气含湿量从 87.25 g /kg 干空气急剧增加到 425.08g/kg 干空气。

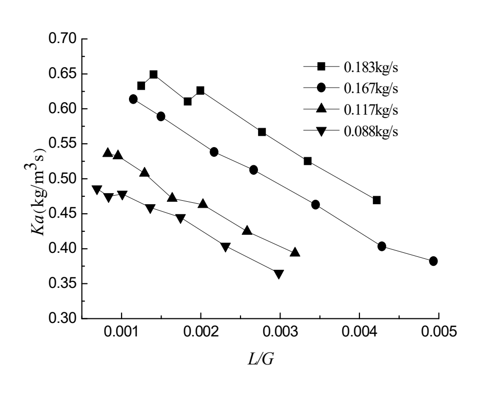
实验中，冷却水温度分别取 10℃,15℃和 25℃。从图 3 可以看出，采用空心小球做堆积床的情况在喷淋温度比较低时，没有表现比采用木条的情况更有优势。但当喷淋温度升高后，采用塑料小球的堆积床的传质系数增加更快。当喷淋温度达到 80℃时，对冷却水温度分别取 10℃,15℃和 25℃时，空心小球的比表面积与传质系数积 *Ka* 平均分别提升了 4.6%，7.6%和 7.9%。冷却水温度越高时提升的效果越明显。实验结果表明，本研究采用的塑料空心小球由于具有宽阔的润湿表面积，并且小球中心具有多孔储水材料，因而具有比方木条更佳的增湿效果。再加上它便宜和耐腐蚀性好，所以是加湿除湿海水淡化系统更好的加湿床堆积材料。

3.2 循环风量对传质系数的影响

系统的循环风量也是强化传质系数的一个重要因素，本实验测试了在不同喷淋量和不同喷淋海水温度时，传质系数随系统循环风量的变化。此时，设定的其他参数分别为冷却进水温度 8-10℃，冷却水流量为 0.217kg/s。首先，测试在不同喷淋量下，风量对传质系数的影响，此时加热海水流量分别取 0.183，0.167，0.117 和 0.088kg/s 时，喷淋温度为固定值 75℃。在此条件下，对系统的传质系数分别进行了测试。图 4 给出了装置分别采用空心塑料小球和方形木条做堆积床的传质系数变化。其中，图 4 中，横坐标 *L/G* 代表海上喷淋量与风量的比值，在喷淋量基本不变的情况下，这个值越小，表示循环风量越大。



（a）采用空心小球做堆积床；



（b）采用方木条做堆积床

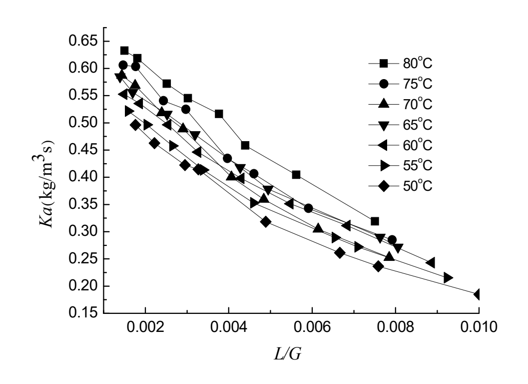
图 4. 不同喷淋量时循环风量对传质系数的影响

Fig.4. Variation of mass transfer coefficient with air mass flow rate in the unit at different water mass flow rates

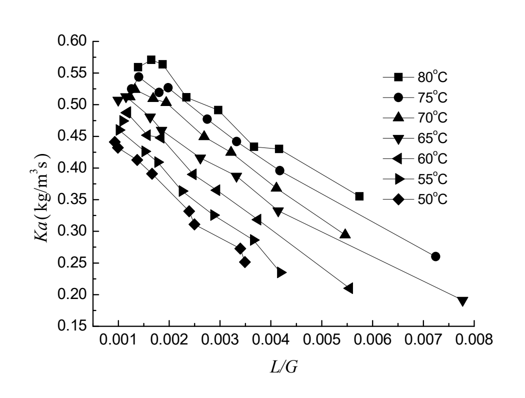
实验结果表明，采用塑料小球做堆积床的比表面积与传质系数积 *Ka* 一般比采用木条做堆积床的大。比如，当喷淋流量为 0.167kg/s，*L/G* 为 0.0015 时，*Ka* 增加了 17%。

实验结果也表明，在风量较小时，随着风量的增加，传质系数一般都增加。但循环风量增加到一定程度后，进一步增加风量，传质系数不一定增加，有时甚至减少。比如当风量增加到大约 $0.19m^3/s$ 后，随着风量的增加，传质系数增加有限，有些情况甚至会下降。所以，风机的功率必须进行优化选择。当喷淋量增加时，风机功率可以适当增加。实验结果也表明，当喷淋量较小时，传质系数也较小。但当喷淋量达到 0.167kg/s 后，传质系数的增加也变慢。当喷淋量分别为 0.167kg/s 和

0.183kg/s 时，传质系数基本不变。说明喷淋量也不能随意加大。



（a）采用空心小球做堆积床；



（b）采用方木条做堆积床

图 5. 不同喷淋温度下循环风量对传质系数的影响

Fig.5. Variation of mass transfer coefficient with air mass flow rate in the unit at different heating temperature

接着，测试在不同喷淋温度下，风量对传质系数的影响，此时加热海水流量固定为 0.167kg/s。图 5 给出了装置分别采用空心塑料小球和方形木条做堆积床的传质系数测试结果。实验结果表明，在不同的喷淋温度下，随着风量的增加，传质系数一般都增加，而且喷淋温度越高，传质系数也越高。实验表明，采用塑料小球做堆积床的比表面积与传质系数积 *Ka* 一般比采用木条做堆积床的大。比如，当喷淋温度为 80℃，*L/G* 为 0.0015 时，*Ka* 增加了 8.8%。

3.3 不同填充床材料下传质系数的比较

在增湿除湿海水淡化中，对空气的加湿过程是最关键的，之前研究者开发了多种加湿床，实验了多种加湿材料，主要是为了提高蒸发床的传质系数。如表 1 中所列 Nawayseh NK（1996）采用了自然对流的方式，研究了木条作为蒸发器堆积床[9]。Al-Hallaj S.（1998）分别采用了自然和强迫对流两种方式，对方形木条做堆积床进行了实验研究，并对木条横向堆积、竖向堆积以及 45° 倾斜堆积的实验结果进行了比较[10-11]。

表 1 马来西亚和约旦的三种实验装置基本参数

Table 1 Technical specifications of three instruments used in experimental of Malaysia and Jordan

参考文献	冷凝器换热面积（m^2）	增湿器表面积（m^2）	增湿器比表面积（m^2/m^3）	装置高度（m）	太阳能集热器面积（m^2）	U_{loss} (W/m^2K)
Nawayseh[9] (Pilot unit)	8.9	11.9	58	3	2.77	1.0
Al-Hallaj[11] (Pilot unit)	4(single) 8(double)	5.04	14	2	2.0	1.0
Al-Hallaj[11] (Bench unit)	0.6(single) 1.2(double)	0.96	87	2	---	1.2

在 Nawayseh NK（1996）和 Al-Hallaj S.（1998）的研究中开发了多种加湿床，实验了多种加湿材料，对加湿器中的热质传递系数进行了理论评估，给出了传质系数随过程参数的变化。文献[5]中作者通过对实验中传质实验散点分析，拟合出流量比和传质系数的函数关系。

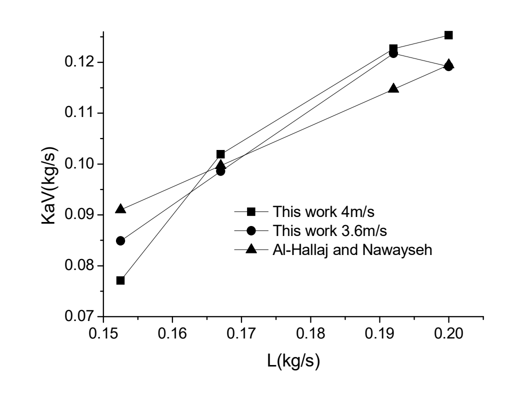


图 6. 比较不同风速和 A-H 实验结果的传质系数

Fig.6.The experimental results about mass transfer coefficient of air mass flow rate and A-H can be compared

图 6 给出了本实验的传质系数与 Nawayseh NK 和 Al-Hallaj S.的实验结果的比较。 结果可以发现，当海水流量较小时，由于塑料球的润湿度不如木条，故传质系数要低于用木条作为填充床的加湿除湿系统。当海水流量逐渐增加，受到塑料球复杂表面的影响，塑料小球做堆积床的传质系数逐渐好于木条。比如，当风速为 4m/s 时，喷淋流量为 0.196kg/s 时，传质系数提高了 7%。由于塑料球无毒耐腐蚀，能够耐受海水的长期浸泡，这是木条无法比拟的。因此利用塑料球作为填充床材料，是一种较好的选择。

4 结论

本文设计了一套增湿除湿海水淡化装置，采用外形特殊的空心塑料小球做堆积床和方形木条做堆积床分别进行了研究。测试了不同运行条件下的稳态产水性能，进而可以求出系统的传质系数。实验结果表明，塑料小球由于具有宽阔的润湿表面积，并且小球中心具有多孔储水材料，因而具有比方木条更佳的增湿效果。在冷却水温度和喷淋温度分别为 25℃和 80℃时，传质系数可以比方木条提高 7.9%。在不同的喷淋温度和喷淋流量运行时，相比木条，塑料小球做堆积床都得到较高的传质系数，表明塑料小球更适合空气加湿除湿型海水淡化的加湿材料。

参考文献：

[1] Miller J A, Lienhard V J H. Impact of Extraction on a Humidification-dehumidification Desalination System [J]. Desalination, 2013, 313 (3): 87-96.

[2] Zhani K, Bacha H B, Damak T. Modeling and Experimental Validation of a Humidification-dehumidification Desalination Unit Solar Part [J]. Energy, 2011, 36(5): 3159-3169.

[3] Mistry K H, Mitsos A, Lienhard V J H, Optimal Operating Conditions and Configurations for Humidification-dehumidification Desalination Cycles [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50 (5): 779-789.

[4] 陶钧, 宫建国, 曾胜, 等. 增湿去湿海水淡化技术的研究进展 [J]. 化工进展, 2012, 31(7): 1419-1424.
TAO Jun, GONG Jianguo, ZENG Sheng, et al. Research Progress of Humidification-dehumidification Process [J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2012, 31(7): 1419-1424.

[5] Nawayseh N K, Farid M M, Al-Hallaj S, et al. Solar desalination Based on Humidification Process: I—Evaluating the Heat and Mass Transfer Coefficients [J], Energy Conversion and Management, 1999, 40 (13): 1423-1439.

[6] Narayan G P, Maximus G St John, Syed M Zubair, et al. Thermal Design of The Humidification Dehumidification Desalination System: An Experimental Investigation [J]. Desalination, 2013, 58(1-2): 740-748.
Farsad S, Behzadmehr A. Analysis of a Solar Desalination Unit with Humidification-dehumidification Cycle using DoE Method [J]. Desalination, 2011, 278(1-3): 70-76.

[7] Bergero S, Chiari A. Experimental and Theoretical Analysis of Air Humidification-dehumidification Processes using Hydrophobic Capillary Contactors [J]. Applied Thermal Engineering, 2001,21:1119-1135.

[8] Nawayseh N K. Solar Water Desalination with Natural Draft Air Humidifcation-dehumidifcation Process [D].Malaysia: University Sains Malaysia, 1996.

[9] Farida M M, Parekhb S, Selmanb J R, et al. Solar Desalination with a Humidification-dehumidification Cycle: Mathematical Modeling of the Unit [J]. Desalination, 2002, 151: 153-164.

[10] Al-Hallaj S. Solar Desalination by Humidifcation-dehumidifcation Cycle [D]. Jordan: Jordan University of Science and Technology, 1994.

[11] Zhani K, Solar Desalination based on Multiple Effect Humidification Process: Thermal Performance and Experimental Validation [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 24: 406-417.